基于 WCDA 水质监测分析*

纪方 [1,2,3]，张健欣 [1,3*]，陈明君 [2]，李会财 [2]

（1. 内蒙古工业大学 电力学院，内蒙古 呼和浩特 010080；
2. 中国科学院高能物理研究所，北京 100049；
3. 内蒙古机电控制重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010051）

摘 要：水切伦科夫探测器阵列(WCDA)是高海拔宇宙线观测站(LHAASO)的主体探测之一，水作为探测器的唯一探测介质，水的洁净度将直接影响探测器对切伦科夫光的探测效率。为保证WCDA物理目标的实现，水衰减长度的实时测量和监测至关重要，是探测器正常运行和标定的关键工作之一。本实验分别介绍了水衰减长度测量装置和紫外可见分光光度计的工作原理，并通过不同波长的LED对各种样品水进行测量，将两种方法的数据结果进行对比分析，找出了两种装置的测量误差分别为0.22m和0.18m，以及工业指标吸光度与科研指标水衰减长度之间的对应关系，并为GEANT4模拟确定了一种Querry水质模型，进一步推进了模拟的真实化。通过对WCDA一号水池水衰减测量装置的验证及从注水到稳定运行期间的水质监测的数据研究，总结了一套稳定可靠的水质监测方案，为二、三号水池的监测工作奠定了良好的基础。

关键词：LHAASO；水质监测；水衰减长度；吸光度

中图分类号：TN152;X832　　　　　**文献标识码：**A

1 引言

LHAASO-WCDA 实验的主要物理目标是实现甚高能伽马天文的全天候的观测，其中包括甚高能伽马源的探测与监测、能谱测量以及扩展形态的研究[1]。WCDA 的总面积为 78,000 平方米，有效水深 4m，由 3 个水池构成，共需要 350,000 吨净化水。每个水池中被黑色隔光帘分隔成多个探测器单元，共 3,120 个单元，每个单元大小为 5m×5m。在 1 号水池的每个单元底部中心位置安装一支光阴极朝上的 8 英寸 PMT，用于接收广延大气簇射的次级粒子在水中产生的切伦科夫光。根据每个 PMT 上接收到的光子数目和光子到达时间，重建出原初粒子的簇射芯位、能量和方向[2]。在每个 8 英寸 PMT 旁边铺放置了一个 1.5 英寸的 PMT，是用于扩大簇射芯区可测量的动态范围，从而实现高能宇宙线的高精度测量[3]。

水作为 WCDA 探测器的关键探测介质，对长期运行的探测器阵列实验至关重要，水的衰减长度直接影响探测器的探测效率，水衰减长度越大，表示水质越好，光探测效率越高。不同实验对水质的要求也不近相同。CHIPS 实验中测量切伦科夫光的衰减长度随滤光时间的变化，研究了 405nm 激光的透射特性，衰减长度高达 100m[4]。中国大亚湾中微子实验中水的衰减长度要求为 30m 以上[5]。 LArTPC 探测器实验中测量出液氩中参杂的氮气分子与闪烁光之间的反应截面为$(7.14\pm0.74)\times10^{-21}cm^2\cdot molecule^{-1}$。百亿分之二（ppm 水平）的掺杂浓度对应的衰减长度为 30m±3m[6]。KM2A 缪子探测器[7]（MD）组自行研制了一种测量装置，在 8m 长的水箱中，安装多光源，达到快速测量水衰减长度的目的。通过对山上超纯水水样以及不同水质水样进行测量，验证该装置在 100m 衰减长度的测量精度可以达到 20%[8]。

*基金项目：国家自然科学基金资助项目（U1831208）；国家自然科学基金资助项目（U1731136）资助.
收稿日期：xxxx-xx-xx；修订日期：xxxx-xx-xx
作者简介：纪方(1992-)，男，硕士，研究方向：检测技术与自动化装置。E-mail: 936138108@qq. com
通讯作者：张健欣（1974-），男，副教授，研究方向：复杂过程建模与优化控制、混杂生产过程调度与优化。E-mail: zhangjianxin@imut. edu. cn

水衰减长度测量方法中，采用的是一种简便易行的直筒式的测量方法，通过改变测量装置中水位的高低来改变光在不同光程下的衰减，即可得到水样的水衰减长度[9]。前期 WCDA 工程阵列样机实验中，通过数据研究分析，发现了一套利用单路计数能谱的第二个峰的峰位变化来监测水质的方法[10]。此方法需要结合直接测量装置的测量结果进行对比分析。GEANT4 模拟时需要给定不同波长下的水衰减长度参数，即需要给出一个和实验接近的水质模型，但通过调研得出 Smith 和 Querry 两种水质模型[11]，需要通过测量确定一个合理的水质模型，为模拟提供可靠的参量。

本实验采用直筒式的测量方法得出一定波长下的水衰减长度，并同紫外可见分光光度计的测量结果进行对比，标定探测介质的衰减长度。并进一步通过不同波长 LED 的测量结果分析，为 GEANT4 模拟提供一组可靠的水质模型参数。

2 水衰减长度测量装置

2.1 测量装置的工作原理

水衰减长度测量装置是一个由 LED 灯、光筒、主水管、光电倍增管（PMT）组成的测量系统，在某一 LED 波长下测量不同水位（h）的 PMT 接收的信号幅度 A，A_0 为 LED 的发光强度，根据水衰减长度定义 λ：

$$A = A_0 e^{-h/\lambda} \tag{1}$$

两边取自然对数得:

$$\ln(A) = \ln(A_0) + (-h/\lambda) \tag{2}$$

得到 PMT 接收到的信号幅值 $\ln(A)$ 与水位高度 h 的线性关系，进而得到水样的 λ 值，即斜率绝对值的倒数。

2.2 WCDA 水衰减长度测量装置

如下图 1 所示为 WCDA 利用该测量原理设计的水衰减长度测量装置。测量步骤如下：第一，用待测水样自动清洗测量装置，以降低实验误差；第二，开启对应的电水阀和水泵开始注水，当水位达到 1.1m 时，关闭电水阀和水泵，LED 和 PMT 电源打开，PMT 采集 LED 的发光信号；第三，控制排水阀，改变测量装置中水的高度 h，测量 PMT 接收到的信号幅值为 A，记录保存实验数据；第四，根据水衰减长度计算公式拟合得到此水样的水衰减长度。

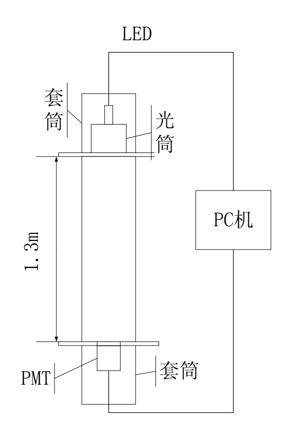


图1 水衰减长度测量装置结构图

Fig. 1 Water attenuation length measuring device structure diagram

水衰减长度测量可以分为自动和手动测量两种方式。在慢控制系统的控制下，实现自动测量，单次水样测量每 2 小时完成一次，达到监测水质的目的。

2.3 WCDA 水衰减长度测量装置稳定性分析和测量结果

在正式测量之前，我们对该装置的稳定性进行了验证分析。利用该装置对水池内水的水质进行了 27

日的监测，通过分析每日的数据误差，论证其系统测量稳定性。如图 2 为测量 27 日每日的测量误差，可以看出误差波动在 0.22m 范围内，说明本装置测量稳定。

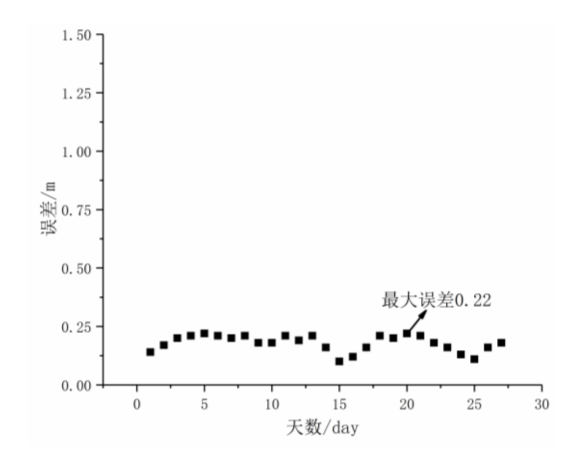
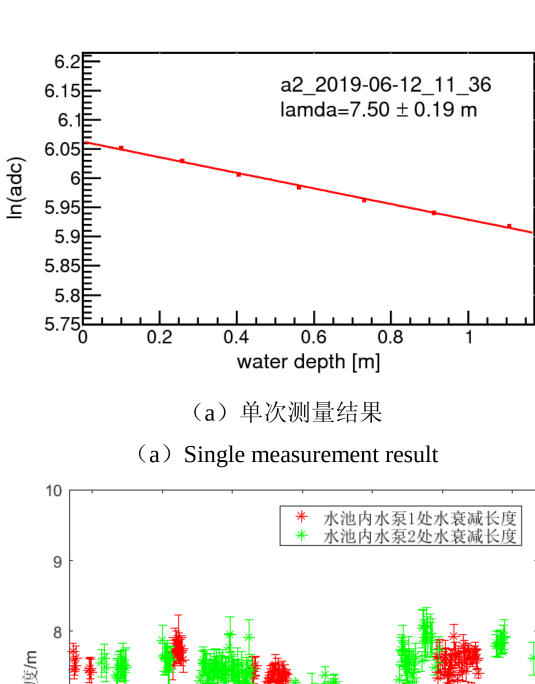


图 2 水衰减长度测量装置测量误差

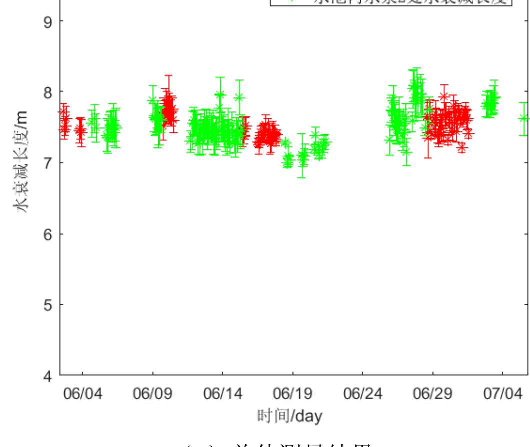
Fig. 2 Measurement error of water attenuation length measuring device

图 3 利用此装置测得在 400nm 波长 LED 下水池水样的结果，图 a 为单次测量拟合得到的水衰减长度，测量误差小于 3%；图 b 是长期测量结果，目前水池内的水质基本维持在 7.53m±0.21m，总体测量误差小于 5%。



（a）单次测量结果

（a）Single measurement result



（b）总体测量结果

（b）Overall measurement result

图 3 测量装置测量结果

Fig.3 Measuring device measuring results

为了和直接测量装置对比研究，本实验中还利用紫外可见分光光度计对同一水样进行测量，得出吸光

度和测量装置给出的水衰减长度的对应关系。

3 紫外可见分光光度计工作原理

3.1 紫外可见分光光度计工作原理

朗伯-比尔定律又称为光吸收基本定律。它表明物质对入射光产生吸收时，吸收强度与光程及吸收物质浓度之间的关系，是紫外吸收光谱和红外光谱定量分析的理论依据。

$$A = \lg(I_0 / I) = \lg(1/T) = -\lg T = KCL \quad (3)$$

其中 A：吸光度，T：透过率，K：吸光系数，C：样品浓度，L：光程，I_0 / I：入射光强度/透过光强度。

紫外可见分光光度计是由光源、单色器、样品室、检测器、放大控制系统和结果显示系统构成。本实验采用的是双光束，有两条光路和一个检测器，两条光路中分别放置参比和样品，光从单色器出来以后经斩波器，依次测定参比和样品。检测器是选用的光电倍增管，当它受到辐射照射后，吸收光子能量，并转变为可测量的物理量，将测试的样品结果显示保存在 PC 机上。该方法测量水样的吸光度是相对吸光度。

3.2 WCDA 紫外可见分光光度计

本次 WCDA 水质测量所使用的为安捷伦科技有限公司生产的 Cary300 型紫外可见分光光度计。首先打开电脑 Scan 软件和 Cary300 设备，预热 1 个小时，再设置测量波长 300nm-700nm，采样时间为 0.2s，采样间隔为 1nm，样品室放入纯水样品进行基线校正，再进行对水样测量。各个水样经紫外可见分光光度计测量的结果是吸光度（Abs），即：

$$Abs = \lg(I_0 / I) \quad (4)$$

依据光的衰减遵从 Beer 定律，假定水的衰减长度为 λ，那么强度为 I_0 的入射光通过 L 长度的水样后的强度为：

$$I = I_0 e^{-L/\lambda} \quad (5)$$

分光计测量时 L 取 0.1m，可计算出各个水样在每个波长下的水衰减长度为：

$$\lambda = (1/(10 Abs \ln 10)) \quad (6)$$

3.3 WCDA 紫外可见分光光度计

在正式测量之前，我们同样利用该装置对水池内水的水质进行了 27 日的监测，分析每日的数据误差，如图 4 为测量 27 日每日的吸光度转化为水衰减长度的测量误差，对该装置的稳定性进行了验证分析。可以看出误差波动在 0.18m 范围内，说明本装置测量同样稳定。

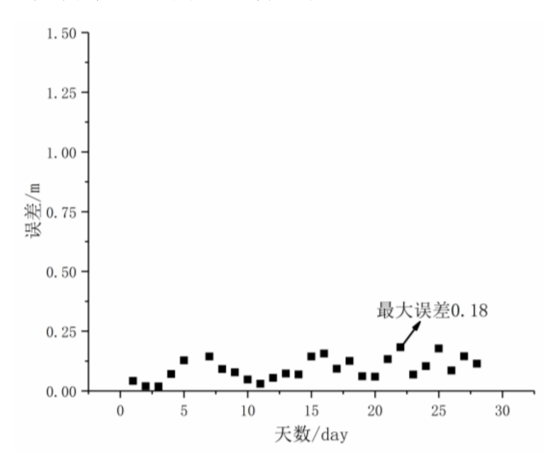


图 4 紫外可见分光光度计测量误差

Fig.4 Measurement error with uv-visible spectrophotometer

紫外可见分光光度计在波长 400nm 时测量各个水样吸光度如图 5 所示，纯水的吸光度基本为零，吸光度值越小，表明水样的透明度越高，水衰减长度数值越大。开始注水时，吸光度快速下降，是不断增加的水量对池水内污染物的稀释作用。循环站处理后的水的吸光度小于水池内水的吸光度，表明循环站处理有一定的净化水质的能力，但尚未达到设计要求。

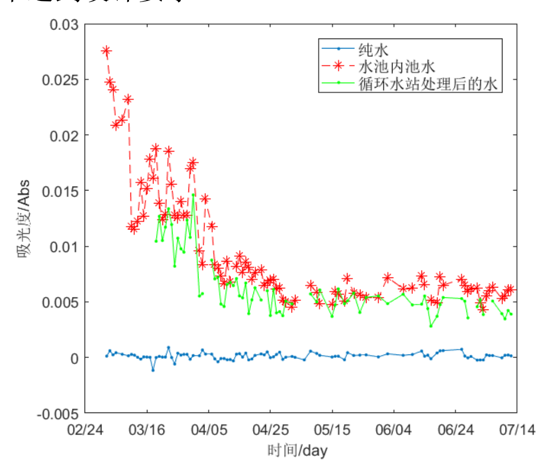


图 5 紫外设备在 400nm 波长下对不同水样的长期监测结果

Fig.5 Long-term monitoring results of different water samples at 400nm wavelength by ultraviolet equipment

4 结果分析

由上述两种测量装置的测试误差分析可以看出，两种测量装置均仍存在一定误差，分析是由于目前 WCDA 水净化循环设备的不稳定，对测量的水样有影响。此外，紫外可见分光光度计测量时由于设备本身误差和每次取样时比色皿上会有不同程度不可避免的污染导致测量结果略微不同。但两种装置测量出的数据误差值都很小，均在可接受范围之内。随后我们利用两种装置对相同水样进行了测量及对比分析。

如图 6 是用水衰减长度测量装置在 18 日内对 WCDA 水池内水的监测结果，水衰减长度是 7.41m±0.21m。同时利用紫外可见分光光度计监测同一水样的结果经转化后，水衰减长度 6.79m±0.37m。两种测量方法得到的水衰减长度结果在误差范围内是符合的。

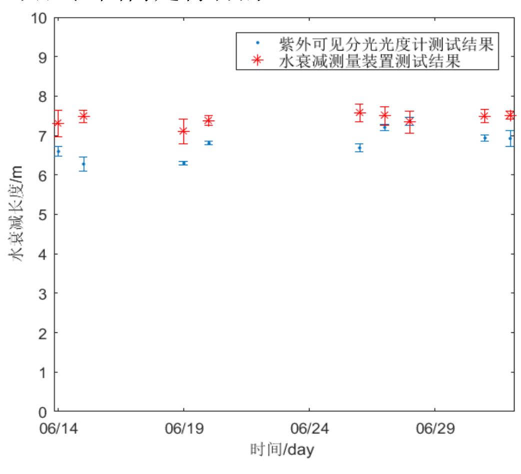


图 6 水池内水的水衰减长度

Fig.6 The attenuation length of water in a pool

我们对两种装置测量出的数据进行了水质模型计算。下表 1 为通过水衰减长度测量装置和紫外可见分光光度计测量得到的水池内的水样在 LED 波长 365nm、385nm 和 400nm 下的水衰减长度，通过三个点得出水衰减长度与波长关系的斜率，分别是 0.08±0.04 和 0.10±0.02。图 7 是水的吸收长度随波长的变化关系图，根据不同的实验结果，给出了两种水吸收长度模型。Smith 和 Querry 水质模型的在相同条件下的斜率分别是 0.79±0.05 和 0.16±0.01。两种装置测量出的数据计算出的斜率，均明确得出水池内水样更接近 Querry 水质模型，因此 GEANT4 模拟确定使用的水质模型为 Querry 水质模型。

表 1 测量数据

Table.1 measurement dat

	波长/nm	λ/m	斜率
水衰减长度测量装置测量水池内水样	365	4.53	0.08
	385	5.07	
	400	7.53	
紫外可见分光光度计测量水池内水样	365	4.23	0.10
	385	5.62	
	400	7.7	
Smith 模型	360	26.24	0.79
	370	33.01	
	380	44.20	
	390	51.10	
	400	56.84	
Querry 模型	350	12.11	0.16
	375	16.15	
	400	20	

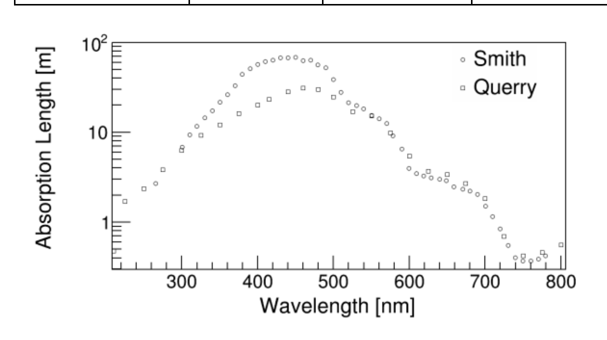


图 7 两种水质模型

Fig.7 Two water quality models

5 结论

本文对水衰减长度测量装置和紫外可见分光光度计两种装置的稳定性进行了验证分析，得出了两种装置的测量误差分别为 0.22m 和 0.18m。利用两种装置对相同水样进行了对比测量分析，证明了两种装置在误差范围内，得到的监测结果相符。

利用水衰减长度测量装置和紫外可见分光光度计两种装置，分析不同 LED 波长下监测得到的水池水样的水衰减长度，通过计算及对比分析，确定了 GEANT4 模拟中应采用 Querry 水质模型。

参考文献：

[1] 中国科学院高能物理研究所. 西藏羊八井宇宙线国家野外观测研究站的建设、运行与发展[J]. 中国科学院刊, 2010(4):461-464.

[2] 曹臻, 刘加丽, 白云翔. 物理学中的世纪难题：高能宇宙线的起源之“谜”[J]. 自然杂志, 2009, 31(6).

[3] 曹臻, 陈明君, 陈松战, et al. 高海拔宇宙线观测站 LHAASO 概况[J]. 天文学报, 2019(3):1-16.

[4] Amat F, Bizouard P, Bryant J, et al．Measuring the attenuation length of water in the CHIPS-M water Cherenkov detector[J]．Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A，2017，844：108-115．

[5] 路浩奇. 大亚湾反符合水切伦科夫探测器及其模型研究[D]. 中国科学院研究生院, 2009.

[6] B．J．P．Jones et al．Journal of instrumentation 8，no．07(July 24,2013)：P07011-P07011．
[7] Zuo X, Xiao G, Feng S, et al. Design and performances of prototype muon detectors of LHAASO-KM2A [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:Accelerators,Spectrometers,Detectors and Associated Equipment,2015,789:143-149.
[8] Cong L，Gang X，Shao hui F，et al. An apparatus to measure water optical attenuation length for LHAASO-MD [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 892:122-126.
[9] Li H C，Yao Z G，Yu C X，et al．A method to monitor and measure the water transparency in LHAASO-WCDA using cosmic muon signals[J]．Chinese Physics C，2017，41(2)：026002．
[10] Li H C，Yao Z G，Chen M J，et al．Study on single-channel signals of water Cherenkov detector array for the LHAASO project[J]．Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators，Spectrometers, Detectors and Associated Equipment，2017，854(Complete)：107-112．
[11] Steve J, Scott P. Optical Absorption of Water Compendium [DB/OL].[2018-09-01] http://omlc.org/spectra/water/abs/index.html．

Based on WCDA water quality monitoring analysis

JI Fang[1,2,3], ZHANG Jian-xin[1,3*], CHEN Ming-jun[2], LI Hui-cai[2]

（1.*College of Electric Power，Inner Mongolia University of Technology，Hohhot Inner Mongolia 010080，China；*
2.*Institute of High Energy Physics，Chinese Academy of Sciences，Beijing 100049，China；*
3.Inner Mongolia Electromechanical Control Laboratory，Hohhot Inner Mongolia 010051，China）

Abstract: The Water Cherenkov Detector Array（WCDA）is one of the main detectors of the High Altitude Cosmic Ray Observatory (LHAASO), water as the only detection medium, the water transparency will directly affect the detection efficiency of Cherenkov Light. In order to ensure the realization of WCDA physical goals, the real-time measurement and monitoring of water attenuation length is very vital, which is one of the key tasks for the normal operation and calibration of detector. In this experiment, the working principle of water attenuation length measuring device and ultraviolet-visible spectrophotometer is introduced, and various samples of water are measured by different wavelength LED, and the data results of the two methods are compared and analyzed. The measurement errors of the two devices were found to be 0.22m and 0.18m, the corresponding relationship between industrial index absorbance and water attenuation length of scientific research index is found, and a Querry water quality model for the GEANT4 simulation is established by simulation, which further promotes the realisation of simulation. Through the verification of WCDA No. 1 water attenuation measuring device and the data study of water quality monitoring from water injection to stable operation, a set of stable and reliable water quality monitoring scheme is summarized, which provides a lot of help for the monitoring work of No. 2 and No. 3 water pools.

Key words: LHAASO; Water quality; Water attenuation; Absorbance